

# Prédiction de l'excursion du débit dans les minis canaux

N. IBRAHIM-RASSOUL<sup>a</sup>, EK. SIAHMED<sup>a</sup>

*a. Université des Sciences et de La Technologie Houari Boumediene (USTHB),  
Faculté de physique, Laboratoire de Mécanique des Fluides Théorique et Appliquée  
BP 32 El-Alia ALGER. Algérie.*

## Résumé :

*L'objectif de ce travail consiste à apporter une contribution à l'étude dudit phénomène instable de Ledinegg, par le développement d'un modèle théorique, permettant de situer le seuil d'apparition de l'instabilité de Ledinegg lors d'un écoulement forcé d'un fluide caloporteur dans un canal vertical soumis à un flux de chaleur constant et uniforme. Dans le but de le qualifier et de le valider, deux études comparatives ont été réalisées. La première a consisté en la confrontation des résultats du modèle à des données issues d'expériences autour d'une boucle thermo hydraulique nommée THTL. La seconde étude comparative consiste en une vérification du modèle par comparaison avec les résultats obtenus par simulation de la même boucle par un code système nommé RELAP5/Mod 3.2. Les résultats obtenus par la présente contribution sont satisfaisants pour les différents régimes d'écoulement.*

## Abstract :

*The present work focuses on a simulation of pressure drop in forced convection boiling in vertical narrow uniformly heated channel. The objective is to determine the point of Onset of Flow Instability (Ledinegg instability: OFI) by varying input flow rate. In addition to closure relationships based on the drift flux model, other constitutive equations are considered in determining the channel pressure drop under steady state boiling conditions. The model validation is performed by confronting the calculations with the Oak Ridge National Laboratory Thermal Hydraulic Test Loop (THTL) experimental data set. Further verification of this model is performed by code-to code verification using the results of RELAP5/Mod 3.2 code.*

**Mots clefs:** Ecoulement diphasique, Transfert de chaleur, instabilité statique, différences finies, schéma itératif.

## 1 Introduction

Un excellent exemple d'instabilités, statique selon le critère de Bouré [1], nous est fourni par la nature, c'est le geyser, qui représente l'une des plus spectaculaires manifestations naturelles d'instabilité d'un écoulement diphasique d'eau et de vapeur. La première étude autour de ces instabilités a été entreprise par M. Ledinegg [2] en 1938. Dans son étude, l'auteur observa le changement de pente de la courbe représentant la caractéristique (perte de charge) du système étudié (tubes d'une chaudière) en fonction du débit; il conclut que l'existence d'une pente négative  $(\partial\Delta P/\partial G)_{canal} \leq 0$  est source d'instabilité. L'objectif de ce travail consiste à apporter une contribution à l'étude du phénomène instable de Ledinegg, par le développement d'un modèle théorique, permettant de situer le seuil d'apparition de cette instabilité lors d'un écoulement forcé d'un fluide caloporteur dans un canal vertical soumis à un flux de chaleur constant et uniforme. Dans le but de le qualifier et de le valider, deux études comparatives ont été réalisées. La première a consisté en la confrontation des résultats du modèle à des données issues d'expériences autour d'une boucle thermo hydraulique nommée THTL [3]. La seconde étude comparative consiste en une vérification du modèle par comparaison avec les résultats obtenus par simulation de la même boucle par un code système nommé RELAP5/Mod 3.2 [4]. Les résultats obtenus par la présente contribution sont satisfaisants pour les différents régimes d'écoulement; en effet les écarts de température sont de l'ordre de 11% alors que celui de

perte de charge totale est de l'ordre de 10%. Ces erreurs relatives sont acceptables, si on considère que celles associées à l'expérience [3] sont de l'ordre de 6 % approximativement. Les hypothèses simplificatrices introduites dans le modèle sont de ce fait jugées acceptables.

## 2 MODELISATION

### 2.1 POSITION DU PROBLEME

On considère un écoulement d'un fluide caloporteur unidimensionnel en régime permanent à travers un canal vertical de section constante (figure 1). On se propose de développer un modèle basé sur les hypothèses simplificatrices énumérées ci-après:

### 2.2 Hypothèses de base et formulation du modèle théoriques :

**H<sub>1</sub>**: L'écoulement est vertical ascendant et unidimensionnel, le mouvement du Caloporteur ayant lieu suivant la direction  $z$  dans le sens positif (suivant la direction de l'écoulement du réfrigérant).

**H<sub>2</sub>**: Le régime de l'écoulement est quasi-stationnaire ( $\frac{\partial}{\partial t} = 0$ ).

**H<sub>3</sub>**: Le transfert interfacial de masse, de quantité de mouvement et d'énergie est supposé nul.

**H<sub>4</sub>**: les facteurs de corrélations surfaciques et temporelles qui sont les rapports des valeurs moyennes de produits des variables aux produits des valeurs moyennes des mêmes variables sont pris égaux à l'unité. Cela signifie que les profils transversaux des paramètres de l'écoulement sont suffisamment plats dans toute section.

**H<sub>5</sub>**: La distribution radiale du taux de vide est représentée par le paramètre de distribution  $C_0$ .

**H<sub>6</sub>**: La section droite (transversal à l'écoulement) est constante  $\frac{\partial A}{\partial Z} = 0$ .

**H<sub>7</sub>**: La phase liquide est supposée être compressible.

**H<sub>8</sub>**: Le flux de chaleur est considéré constant et uniforme.

**H<sub>9</sub>**: La force de volume est la pesanteur.

**H<sub>10</sub>**: La température d'entrée du fluide caloporteur est en dessous de la température de saturation  $T_{sat}$  ;

**H<sub>11</sub>**: La pression de sortie est fixée (connue).

Dans la présente approche, le canal d'écoulement est subdivisé en deux régions distinctes :

**H<sub>12</sub>**: Une Région monophasique qui consiste en l'écoulement de la phase liquide et/ou ébullition nucléée partielle (formation d'une couche mince de nucléons de vapeur à la paroi). Cette région s'étend de la côte  $Z=0$  (entrée du canal) jusqu'à la côte  $Z_d$  (coordonnée axiale dans le canal où survient le seuil de détachement des bulles de la paroi) ;

**H<sub>13</sub>**: Une Région diphasique qui s'étend au-delà du point de seuil de détachement des bulles de la paroi (côte  $Z_d$ ) jusqu'à la sortie du canal  $Z = L_T$ .

$V_{gl}$  ici est la vitesse de glissement, m/s,  $C_0$  c'est le paramètre de distribution,  $q$ : représente le flux thermique surfacique  $MW/m^2$ ,  $J$ : vitesse superficielle, m/s, l'indice  $onb$ : apparition de la nucléation,  $sat$  Saturation.

L'axe de coordonnées axiales est représenté par la variable  $Z$ .  $L_T$  représente la hauteur du canal chauffé. Une représentation schématique du canal et des différents régimes d'écoulements susceptibles d'apparaître le long de celui-ci est donnée en Figure1.

## 3 Equations

Par son réalisme physique et sa relative simplicité, le modèle de diffusion (Drift flux model) est actuellement l'un des plus utilisés dans la modélisation des écoulements diphasiques [5]. Ce modèle a été initialement développé par Zuber et Findlay en 1965 [6]. Ces deux auteurs ont montré de façon plus générale l'importance des profils du taux de vide, de la vitesse moyenne et de l'écart local entre les vitesses des

phases.

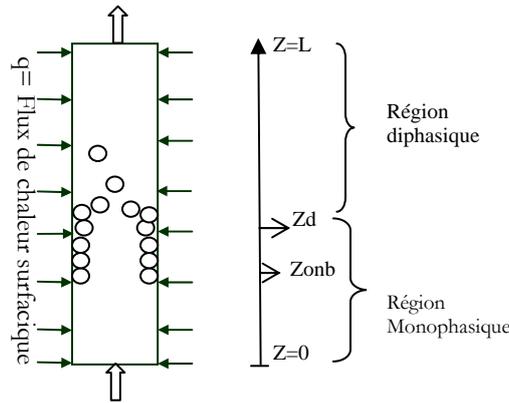


FIG. 1 – Représentation schématique de la subdivision du Mini-Canal en deux régions.

### 3.1 Région diphasique qui s'étend de $Z_d \leq Z \leq L_T$ :

Dans cette région, le fluide caloporteur (mélange : liquide - vapeur) est un fluide compressible à propriétés physiques variables.

Bilan de masse du mélange

$$\frac{d(\rho_m V_m)}{dz} = 0 \Rightarrow \rho_m V_m = G = Cst \quad (1)$$

Où la masse volumique est donnée par :  $\rho_m = \alpha \rho_v + (1 - \alpha) \rho_l$

L'écoulement du caloporteur dans le conduit entraîne une évolution de la pression le long de celui-ci. Ce gradient de pression est dû aux frottements, la gravité et à l'inertie. En négligeant la tension superficielle, l'équation de mouvement du mélange est obtenue comme suit

Bilan d'énergie du mélange

$$\rho_m V_m \frac{dh_m}{dz} = \frac{qp}{A} - \frac{d}{dz} \left[ V'_{gj} \left( \frac{\rho_l \rho_v}{\rho_m} \right) \frac{\rho_l - \rho_m}{\rho_l - \rho_v} (h_l - h_v) \right] \quad (2)$$

Si l'on néglige l'énergie cinétique et on introduit la vitesse de glissement, on obtient l'équation de l'énergie suivante

Bilan de la quantité de mouvement du mélange

$$\frac{dP_m}{dz} = -\rho_m V_m \frac{dV_m}{dz} - \frac{f_m G^2}{2D_h \rho_m} - \rho_m g - \frac{d}{dz} \left[ V'^2_{gj} \frac{\rho_l \rho_v}{\rho_m} \frac{\rho_l - \rho_v}{\rho_m - \rho_v} \right] \quad (3)$$

Ou  $V'_{gj} = V_{gj} + (C_0 - 1) \cdot J_t$ , avec  $V_{gj}$  définit la vitesse de glissement qui à savoir :

$$V_{gj} = 1.41 \left[ \frac{\sigma \cdot g \cdot (\rho_l - \rho_g)}{\rho_l^2} \right]^{1/4}, \text{ Avec un paramètre de distribution égale à : } C_0 = 1.13.$$

Equation de la diffusion

$$\frac{d(\alpha \rho_g V_g)}{dz} = \Gamma_g \quad (4)$$

Où  $\Gamma_v$  est le taux de génération de la vapeur par unité de volume.

### 3.2 Région monophasique qui s'étend de $0 \leq Z \leq Z_d$

Le système d'équations qui régit l'écoulement du fluide caloporteur dans la région monophasique est obtenu : soit en posant  $\alpha=0$  dans le système sus indiqué, ou à partir des hypothèses du modèle Homogène. Ce qui se traduit par les équations suivantes

Equation de la continuité

$$\frac{d(\rho_l V_l)}{dz} = 0 \quad (5)$$

Equation de la quantité de mouvement

$$\frac{dP_l}{dz} = -\frac{f}{2D} \rho_l V_l^2 + \rho_l g - \frac{d}{dz} \left( \frac{G^2}{\rho_l} \right) \quad (6)$$

Equation de l'énergie

$$V_l \frac{dh_l}{dz} = \frac{qp}{A\rho_l} \quad (7)$$

## 4 METHODE NUMERIQUE

Le système d'équations non linéaires ainsi obtenu est du premier ordre en  $Z$  à quatre inconnues ( $P, \alpha, V_m, h_m$ ) ; ce nombre d'inconnues est réduit à trois dans la région monophasique. Ce système est transformé en équations algébriques à l'aide d'un schéma explicite aux différences finies. La résolution permet d'avoir, pas à pas, les profils de pression, taux de vide, enthalpies ainsi que les Températures du fluide caloporteur et de la paroi. Le système algébrique non linéaire résultant accompagné des conditions aux limites est résolu par un processus itératif. Le calcul est jugé convergent lorsque la pression calculée à la sortie du canal avoisine la valeur expérimentale connue, c'est-à-dire :  $|P_N - P_{ext}| \leq \varepsilon$

$P_N$  : est la valeur de la pression obtenue par la présente étude au nœud  $i_N$  (dernier nœud) qui correspond à la sortie du canal.

$P_{ext}$  : est la valeur de la pression telle fixée par l'expérience, à la sortie du canal.

$\varepsilon$  : est l'erreur (fixée) sur la précision de la pression.

## 5 PRESENTATION DES RESULTATS

La première étape permet de vérifier le modèle Thermo hydraulique et particulièrement les pertes de charges dues aux frottements. La Figure.2, présente  $\Delta P = f(G)$  pour un flux de chaleur nul. Plusieurs corrélations estimant le facteur de frottement (7 corrélations notées ici par: option 1-7) ont été utilisées pour mettre en évidence la sensibilité des résultats à ce paramètre. Nous constatons que le modèle établi reflète parfaitement, par rapport aux données expérimentales, le comportement du fluide dans le canal sous les conditions de flux surfacique nul.

La seconde étape consiste à appliquer un flux de chaleur constant et uniforme et à déterminer le débit minimal qui occasionne l'apparition de l'instabilité de Ledinegg ainsi que la perte de charge associée. La Figure. 3 montre l'évolution de la perte de charge totale en fonction du débit massique le long du canal pour un flux de chaleur  $4.3 \text{ MW/m}^2$ , Cette figure fait apparaître une grande conformité entre les résultats expérimentaux de Simon\_tov et al[3] et ceux obtenus par la présente étude. D'une manière générale les écarts enregistrés entre nos résultats et ceux de l'expérience [3] sont de l'ordre de (1.7% à 10.2%) pour la perte de charge totale  $\Delta P(G_1)$ , et de (6.38% à 27.1%) pour la perte de charge associée à l'instabilité de Ledinegg (lorsque l'écoulement devient instable). Le débit pour lequel est observé l'OFI ((l'apparition de l'instabilité de Ledinegg est notée dans le présent travail par OFI : onset of flow instability) est estimé avec une erreur relative de (0.51% à 11.8%).

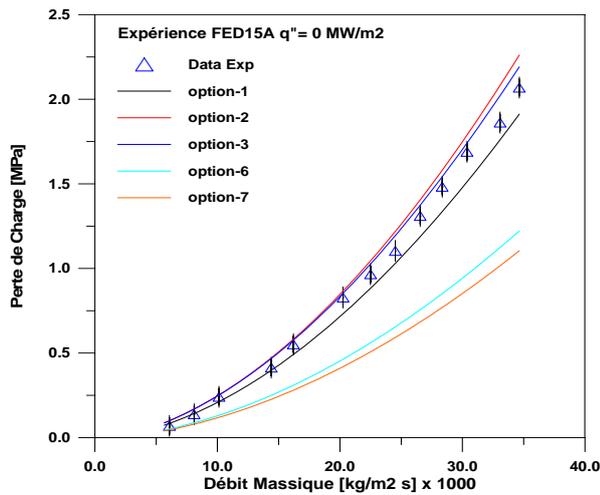


FIG. 2 – Perte de Charge pour  $q=0 \text{ MW/m}^2$   
(7 corrélations pour le facteur de frottement notées ici par 7 options)

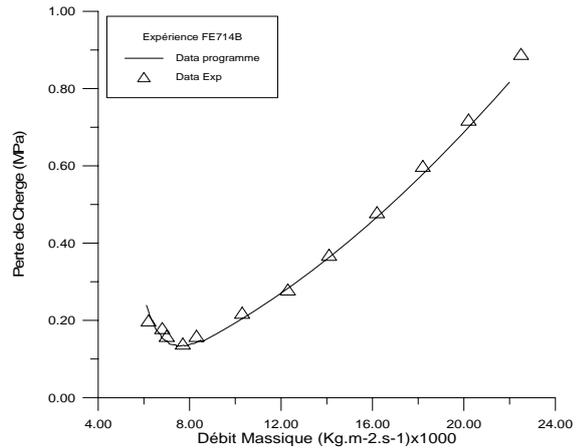


FIG. 3– Perte de Charge pour  $q=4.3 \text{ MW/m}^2$

Sur les figures (4.5), on compare les résultats numériques que nous avons obtenus (noté par OFI) avec ceux obtenus par la référence [7] utilisant la version RELAP5/Mod 3.2 et ceux de Simon-Tov [3] en rapportant les résultats sur un même système d'axes que les graphes obtenus par la présente étude. Ces figures présentent la perte de charge totale en fonction du débit massique  $\Delta P = f(G)$  pour les expériences FED15A (flux de chaleur nul), FE712B (flux de chaleur de  $1.9 \text{ MW/m}^2$ ). Cette comparaison fait apparaître une grande conformité entre les résultats expérimentaux de Simon-Tov [3] et ceux du présent travail pour la plus part des cas considérés. Néanmoins, on remarque que les prédictions du code RELAP5 sont beaucoup plus éloignées des valeurs expérimentales que les prédictions du présent travail.

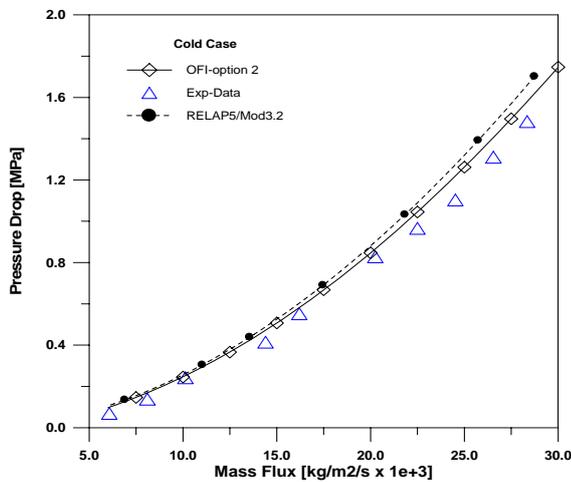


FIG. 4 – Perte de Charge pour  $q=0 \text{ MW/m}^2$

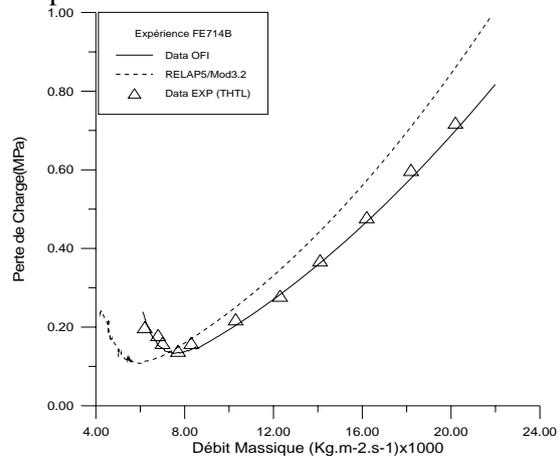


FIG. 5– Perte de Charge pour  $q=1.9 \text{ MW/m}^2$  Les

Figures (6, 7), montrent l'évolution de la température de la paroi et celle du fluide caloporteur tout le long du canal pour les cas ( $2\text{MW/m}^2, 4.3\text{MW/m}^2$ ). L'allure de la distribution axiale des deux températures (paroi et caloporteur) est conforme à celle prévue par Collier [8]. En effet, l'évolution de la température de la paroi se fait linéairement en fonction de la variable  $Z$ , jusqu'à ce que la nucléation apparaisse (à la paroi à la côte notée par  $Z_{onb}$  dans le présent travail) au-delà de cette côte, la température de la paroi se stabilise à quelques degrés au dessus de la température de saturation (profil quasi-rectiligne).

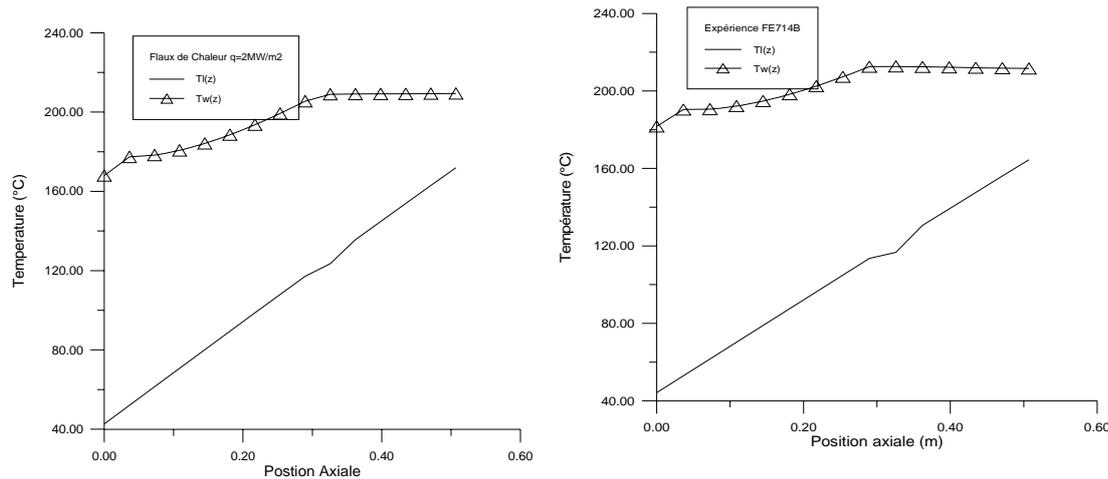


FIG. (6,7) –Distribution des Températures de la Paroi et du fluide caloporteur

## 6 CONCLUSION

Un modèle physique pour la détermination de ce seuil d'instabilité (noté par OFI dans la présente étude) a été développé en se basant sur le modèle à quatre équations appuyé de relations constitutives en guise de fermeture du problème. Ce modèle permet le calcul de l'évolution axiale des paramètres thermo hydrauliques du fluide caloporteur en convection forcée. Il détermine également les limites séparant les différents régimes d'écoulement. Les résultats obtenus par la présente contribution sont satisfaisants pour les différents régimes d'écoulement; en effet l'écart de température est de 11% pour la température de la paroi et de 10% pour la température du fluide caloporteur, le débit massique qui occasionne l'apparition de l'instabilité de Ledinegg est prédit avec une incertitude de 15%, l'écart de la perte de charge totale n'est que de 10.% et de 27.11% pour la perte de charge  $\Delta P_c$  qui est associée à l'OFI. Les erreurs relatives obtenues lors de cette étude, sont acceptables, si on considère les erreurs relevées par l'expérimentateur et qui sont de 6% pour la perte de charge, de 5.4% pour le débit massique et de 2% pour la température. Les résultats numériques montrent une bonne concordance avec les résultats expérimentaux. Le modèle utilisé semble bien capturer l'essentiel du phénomène et ce qui permet de justifier les hypothèses adoptées dans cette étude. L'erreur moyenne de notre programme 'OFI' pour l'estimation du débit critique n'est alors que de 1.54% alors que pour le code RELAP5/Mod 3.2, elle est de 11%.

## References

- [1] A BOURÉ, et al, Review of Two-Phase Flow Instability, Nuclear Engineering and Design 25.165-192, 1973.
- [2] LEDINEGG, M., Instability in Flow during Natural and Forced Circulation, Die-Warme, Vol 61, N°48, 891-898, 1938.
- [3] SIMON-TOV et al, Progress Report on the ANS Thermal –Hydraulic Test Loop Operation and Results, ORNL/TM-12972, 1995.
- [4] Fletcher, C.D, ET Schultz, R.R, RELAP5/MOD3 Code Manual, Vol I to VI, NUREG/CR-5535, INEL-95/017. Idaho National Engineering Laboratory, 1995.
- [5] Liping. C., Dynamic Simulation of the Pressure Drop Type Instability in an Up flow Two-Phase Boiling System, PhD Thesis University of Miami, Dec, 2000.
- [6] Zuber, N., et Findlay, Average Volumetric Concentration in Two-Phase Flow Systems, J. Heat and Mass Transfer, Vol 84, pp 453-468, 1965.
- [7] Hamidouche, T et al RELAP5/Mod 3.2 Assessment study under low pressure onset of flow instabilities, International Conference on Nuclear for New Europe, Portoroz, Slovneia, 6-9 September, (2004).
- [8] Collier, J. G. 1980. Convective Boiling and Condensation. 2nd Ed. Atomic Energy Research, Establishment, Harwell, McGraw-Hill International Book Company.